

## CRISTAL DE CUARZO Y EL EFECTO PIEZOELECTRICO

Algunos materiales cristalinos tales como el cristal de cuarzo tienen una característica poco usual. Si se corta una “rebanada” delgada del material se la estructura molecular natural (de forma hexagonal), y se aplica una tensión eléctrica a través de las superficies de sus caras, el material entra en vibración mecánica. La tasa de vibración es una frecuencia definida con exactitud. El intercambio de energía eléctrica a mecánica y viceversa se llama efecto piezoeléctrico. Esto es análogo al efecto de volante del tanque L-C con su continuo intercambio de energía inductiva magnética y capacitiva dieléctrica. La vibración u oscilación del cristal continuará mientras las pérdidas de energía en el cristal se compensen sobre bases regulares o repetitivas por la adición de energía eléctrica.

Cuando un voltaje alterno se aplica a través de un cristal en o cerca de la frecuencia de resonancia natural del cristal, el cristal se romperá en oscilaciones mecánicas. Las vibraciones mecánicas se llaman ondas acústicas volumétricas (BAW) y son directamente proporcionales a la amplitud del voltaje aplicado.

Un número de sustancias de cristal naturales exhiben propiedades piezoeléctricas: el cuarzo, la sal de Rochelle, y la turmalina así como varias sustancias fabricadas como ADP, EDT, y DKT. El efecto piezoeléctrico es más pronunciado en la sal de Rochelle, por esta razón es el elemento mayormente utilizado en micrófonos de cristal. Sin embargo el cuarzo sintético, se utiliza más ampliamente para el control de frecuencias en los osciladores debido a su permanencia, bajo coeficiente de temperatura y alta Q mecánica.

Cortes en los cristales. Dentro de la naturaleza, los cristales completos de cuarzo tienen un corte hexagonal con terminaciones en punta fig 1.

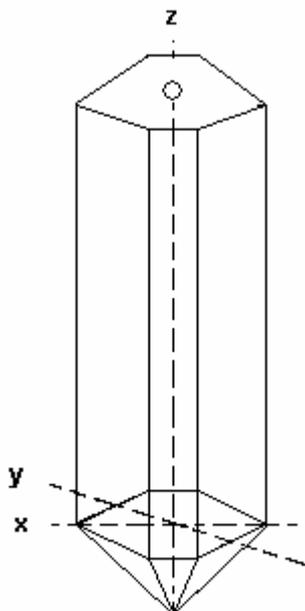


Figura 1

Se asocian tres conjuntos de ejes con un cristal: óptico, eléctrico y mecánico. El eje longitudinal que une las puntas al final de los cristales se llama el eje Z u óptico. Las tensiones eléctricas aplicadas al eje óptico no producen el efecto piezoeléctrico. El eje X o eléctrico pasa diagonalmente a través de las esquinas opuestas del hexágono. El eje que es perpendicular a las caras del cristal es el eje Y o mecánico. En la figura 2 se muestra los ejes y el comportamiento básico de un cristal de cuarzo.

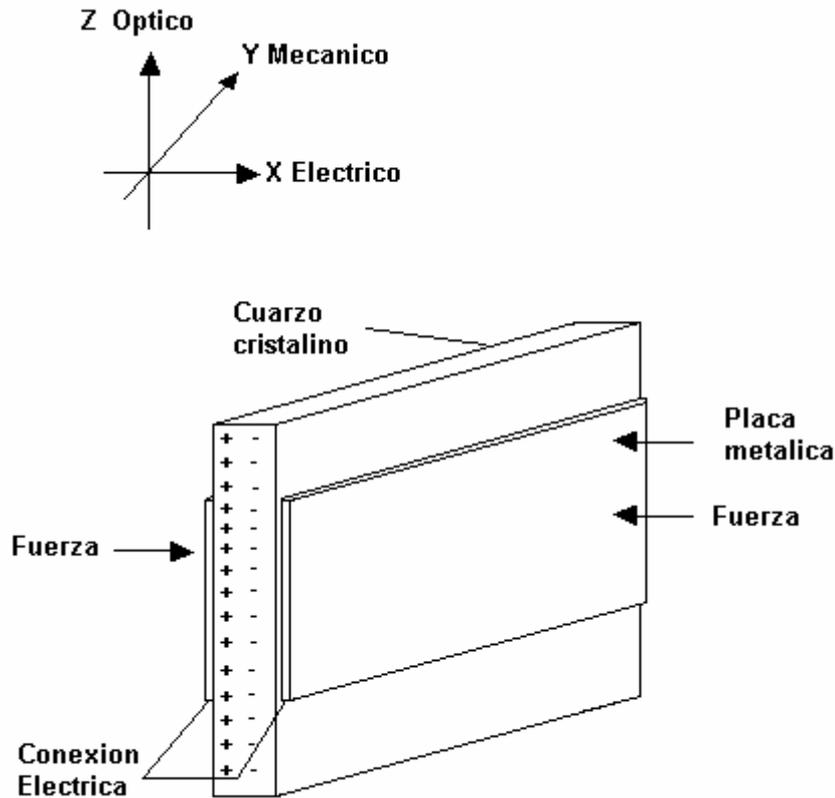
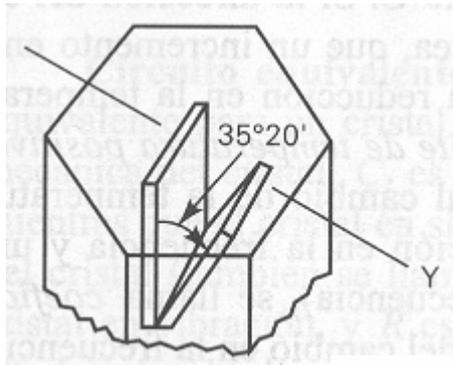


Figura 2

Si se corta del cristal una sección delgada y plana de tal forma que los lados planos sean perpendiculares a un eje eléctrico, los esfuerzos mecánicos a lo largo del eje Y producirán cargas eléctricas en los lados planos. Como la tensión cambia de la compresión a la tensión, y viceversa, se invierte la polaridad de la carga. De forma contraria, si una carga eléctrica alterna se coloca en los lados planos, se produce una vibración mecánica a lo largo del eje Y. Esto es el efecto piezoeléctrico y también se presenta cuando se aplican fuerzas mecánicas a lo largo de las caras de un cristal cortado con sus lados planos perpendiculares al eje Y. Cuando se corta una sección delgada del cristal paralela al eje Z con sus caras perpendiculares al eje X, se llama un cristal con corte eje X. Cuando las caras son perpendiculares al eje Y, se llama un cristal con corte Y. Se puede obtener variedad de cortes al rotar el plano de corte alrededor de uno o más ejes.

Si el corte Y se realiza en un ángulo de  $35^{\circ} 20'$  del eje vertical (figura 3), se obtiene un corte AT. Otros tipos de cortes son el BT, CT, DT, ET, AC, GT, MT, NT y JT. El corte AT es el más popular para los resonadores de cristal de alta y muy alta frecuencia.

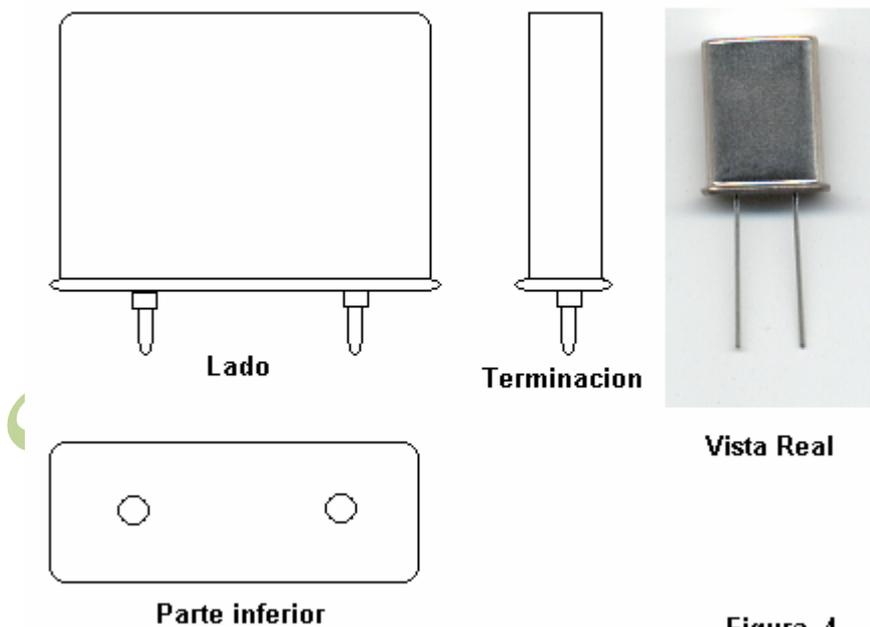
El tipo, largo y grosor de un corte y el modo de vibración determinan la frecuencia de resonancia natural del cristal.



**Figura 3**

Las frecuencias de resonancia para cristales con corte AT varían desde aproximadamente 800 KHz hasta aproximadamente 30 MHz. Los cortes CT y DT exhiben un corte de baja frecuencia y son más útiles en la banda de 100 a 500 KHz. Por otro lado el corte MT vibra longitudinalmente y es útil en las bandas de 50 a 100 KHz mientras que el corte NT tiene un campo útil por debajo de 50 KHz.

Los cortes de cristal son montados por lo general en portacristales, los cuales incluyen la montura y los ensambles de la cubierta. Una unidad de cristal se refiere al porta cristal y al cristal en sí mismo. La figura 4 muestra una montura común para cristales.



**Figura 4**

Debido a que la estabilidad de un cristal depende hasta cierto grado de la temperatura, una unidad de cristal puede montarse en un horno para mantener una temperatura de operación constante.

La relación entre la frecuencia de operación del cristal y su grosor se expresa con la siguiente ecuación:

$$H = 65.5 / f_n$$

En donde H = grosor del cristal en pulgadas

$f_n$  = Frecuencia de resonancia natural del cristal en Hz.

Esta fórmula muestra que para oscilaciones de alta frecuencia el corte del cristal deberá de ser muy delgado. Esto dificulta la fabricación de osciladores de cristal con frecuencias fundamentales por arriba de 30 MHz aproximadamente, por que el corte es tan delgado que se vuelve altamente frágil, y los cortes y el pulido convencionales solamente pueden lograrse con un esfuerzo externo. Este problema puede mejorarse utilizando un grabado químico para obtener cortes más delgados. Con este proceso, es posible obtener cristales con frecuencias fundamentales de hasta 350 MHz.

Coeficiente de temperatura.

La frecuencia de resonancia natural de un cristal es influenciada relativamente por su temperatura de operación. La relación entre la magnitud del cambio en la frecuencia ( $\Delta f$ ) y el cambio en la temperatura ( $\Delta C$ ) se expresa en cambios de Hz por Mhz de frecuencia de operación del cristal por grados Celsius (Hz/MHz/°C). El cambio fraccionado en frecuencia se da frecuentemente en partes por millón (ppm) por °C. Por ejemplo, un coeficiente de temperatura de  $-20$  Hz /MHz/°C es igual que  $+20$  ppm/°C. Si la dirección del cambio de frecuencia es igual al cambio en la temperatura (o sea, que un incremento en la temperatura causa un incremento en la frecuencia, y una reducción en la temperatura causa una reducción en la frecuencia), es llamado coeficiente de temperatura positivo. Si por el contrario el cambio de la frecuencia está en la dirección opuesta al cambio de la temperatura (o sea, un incremento en la temperatura causa una reducción en la frecuencia y una reducción en la temperatura causa un incremento en la frecuencia), se llama coeficiente de temperatura negativo. Expresado matemáticamente, la relación del cambio en la frecuencia de un cristal con un cambio de temperatura es:

$$\Delta f = k(f_n * \Delta C)$$

En donde

$\Delta f$  = Cambio en la frecuencia (Hz)

K = Coeficiente de temperatura (Hz/MHz/°C)

$f_n$  = frecuencia natural del cristal en MHz

$\Delta C$  = Cambio en la temperatura (°C)

**Y**

$$f_0 = f_n + \Delta f$$

en donde  $f_0$  es la frecuencia de operación.

El coeficiente de temperatura k de un cristal varía dependiendo del tipo de corte y su temperatura de operación. Para un rango de temperaturas de aproximadamente 20°C a 50°C, los cristales con corte x y y tienen un coeficiente de temperatura que casi es constante. Los cristales con corte x son aproximadamente 10 veces más estables que los cristales con corte Y. Por lo general, los cristales con corte X tienen un coeficiente de temperatura que varía de  $-10$  a  $-25$  Hz/MHz/°C. Los cristales con corte Y tienen un coeficiente de temperatura que varía de aproximadamente  $-25$  a  $+100$  Hz/MHz/°C.

Actualmente, se dispone de cristales con un coeficiente de cero (corte GT) que tiene un coeficiente de temperatura tan bajos como  $-1$  a  $+1$  Hz/MHz/°C. El cristal con corte GT es casi un cristal con coeficiente cero perfecto de congelamiento a ebullición, pero es útil a frecuencias por debajo de unos cuantos cientos de KHz.

Circuito equivalente del cristal. Se muestra en la figura 5 el circuito eléctrico equivalente para un cristal.

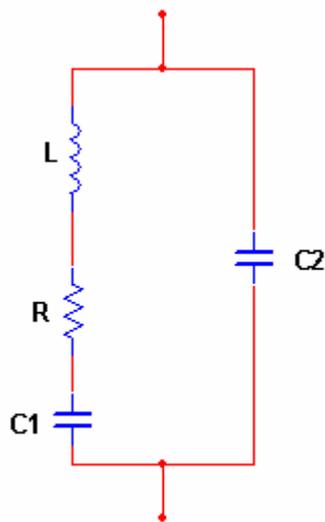


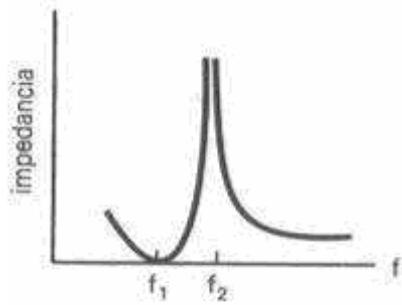
Figura 5

Cada componente eléctrico es equivalente a una propiedad mecánica del cristal.  $C_2$  es la capacitancia real formada entre dos electrodos del cristal, mientras que el cristal en sí es el dieléctrico.  $C_1$  es equivalente al relajamiento mecánico del cristal (también es llamado resistencia o elasticidad).  $L_1$  es equivalente a la masa del cristal en vibración, y  $R$  es la pérdida por fricción mecánica. En un cristal, presenta un valor alto la relación de masa a fricción mecánica ( $L/R$ ). Los valores típicos de  $L$  varían de 0.1 H hasta más de 100 H; por consecuencia, son bastante altos los factores  $Q^1$  para los cristales. Los factores  $Q$  sobre el rango de 10,000 a 100,000 y más alto son muy frecuentes (en comparación con los factores  $Q$  de 100 a 1,000 para los inductores discretos utilizados en los circuitos tanque LC. Esto proporciona la alta estabilidad de los osciladores de cristal en comparación con los osciladores de circuito tanque LC discreto. Los valores de  $C_1$  son típicamente menores que 1 pf, mientras que los valores para  $C_2$  varían entre 4 y 40 pf.

Debido a que existe un circuito equivalente en serie y uno en paralelo para un cristal, también existen dos impedancias equivalentes y dos frecuencias de resonancia, una en serie y una en paralelo.

Un cristal puede operar en su frecuencia de resonancia en paralelo o en serie, dependiendo de la configuración del circuito en el que se utilice. La relativa profundidad de la curva de impedancia que se muestra en la figura 6 también contribuye a la estabilidad y exactitud de un cristal.

<sup>1</sup>  $Q$  de una bobina. El valor de la reactancia inductiva indica la capacidad que tiene una bobina para generar un voltaje autoinducido, ya que este valor incluye los factores de frecuencia e inductancia. Sin embargo, una bobina posee una resistencia interna  $r$  cuyo valor es igual a la resistencia del alambre con el que está hecha. Esta resistencia interna  $r$  reduce la corriente, lo cual significa una capacidad menor por parte de la bobina para generar voltaje inducido. Al combinar estos factores (Reactancia y resistencia) se obtiene la expresión que proporciona una medida de la calidad de la bobina  $Q = X_L / r = 2\pi fL / r$



**Figura 6**

la frecuencia de resonancia<sup>2</sup> en serie de un cristal de cuarzo es simplemente:

$$f_1 = 1 / (2\pi \sqrt{LC_1})$$

y la frecuencia de resonancia en paralelo es:

$$f_2 = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$$

en donde C es la combinación en paralelo de C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>.

Aunque existen distintas configuraciones para los osciladores utilizando cristales, las más comunes son el discreto y el pierce de circuitos integrados y el medio puente de RLC. Cuando sea necesaria una muy buena estabilidad en la frecuencia y circuitos razonablemente sencillos, el pierce discreto es una buena opción. Cuando la principal preocupación sea el bajo costo y la capacidad de una interface digital sencilla, será suficiente con un oscilador pierce utilizando Ic's.

---

<sup>2</sup> Resonancia. La reactancia inductiva aumenta con forme se incrementa la frecuencia, pero la reactancia capacitiva disminuye cuando la frecuencia aumenta. A consecuencia de estas características opuestas, para cualquier combinación LC debe de existir una frecuencia en la que  $X_L = X_C$ , ya que una aumenta mientras que la otra disminuye. Este caso, donde las reactancias opuestas son iguales, recibe el nombre de resonancia y se dice que entonces que el circuito de ca es un circuito resonante.

### Circuito para comprobar cristales

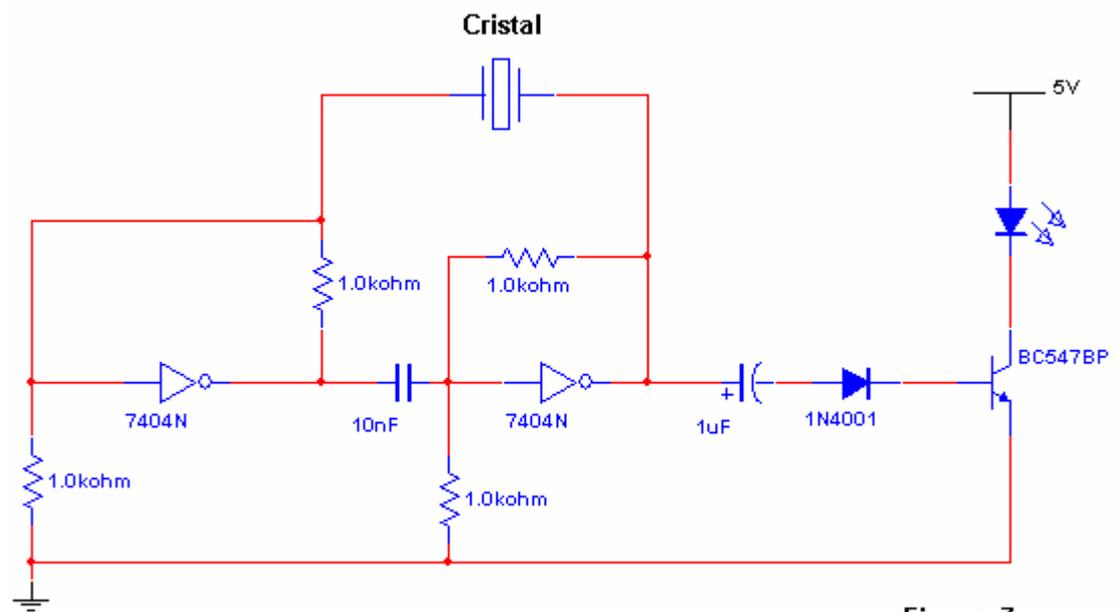


Figura 7

Con este sencillo circuito el cual está compuesto principalmente por un oscilador se puede saber si el cristal está en buenas condiciones o no, al no estar el cristal o ser defectuoso el led no se encenderá y por el contrario si el cristal se encuentra en buenas condiciones se mostrará con el led encendido.

SOLEC MEXICO

BIBLIOGRAFIA

Tomasi Wayne. 1996. **SISTEMAS DE COMUNICACIONES ELECTRONICAS**  
México. 1° ed. Prentice Hall.

Lapatine Sol. 1996. **ELECTRONICA EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN**  
México. 6° ed. LIMUSA

Grob. 1996. **ELECTRONICA BASICA**  
México. 5° ed. McGraw.Hill

<http://www.solecmexico.com/>

Solectmexico